

EFFET DE CYCLES HYDRIQUES SUR LA PERMEABILITE DE MATERIAUX LIMONO-SABLEUX COMPACTES

EFFECTS OF HYDRIC CYCLES ON HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF COMPACTED SANDY-SILTS

Yasmina BOUSSAFIR¹, Laurent ARBARET²

¹ *Université Gustave Eiffel, Ifsttar, Laboratoire Sols Roches et Ouvrages géotechniques, 77447 Marne la Vallée, France*

² *ISTO, Université d'Orléans CNRS BRGM – UMR7327, 45071 Orléans, France*

RÉSUMÉ – L'application de cycles hydriques sur des sols compactés statiquement à 95% de l'optimum Proctor normal, a des effets sur les propriétés du sol compacté. L'expérience menée jusqu'à 6 et 12 cycles en utilisant du limon sableux B5 en provenance d'une digue de Loire, a montré une augmentation de la perméabilité, une augmentation de la macroporosité associée à une modification de la microstructure observée en tomographie par rayons X.

ABSTRACT – Hydric cycles applied on compacted soils (at 95% of the optimum density) have strong effects on soil properties. The experience, realized 6 and 12 cycles on a silty soil from a french levee (classified B5 according to french standard, NF P11-300), leads to increase the hydraulic conductivity and the macro porosity. At the same time, the microstructure is strongly modified as observed with RX tomography.

1. Introduction et objectifs

L'étude du vieillissement des matériaux peut se faire en reproduisant les effets des environnements extérieurs sur les matériaux compactés, tels qu'ils sont utilisés dans les ouvrages en terre et les digues. Nous avons ainsi étudié le vieillissement d'un sol compacté sous l'influence de la météorologie en reproduisant l'effet des cycles de séchage et d'humidification caractéristiques du climat français. Les observations sur ouvrages instrumentés ont permis de conclure qu'un cycle correspond à l'échelle d'une année, à une alternance entre une période sèche estivale et une période humide hivernale (Bicalho et al., 2018 ; Boussafir et al., 2016).

Ainsi pour reproduire le vieillissement lié à la météorologie de manière accélérée en laboratoire, il suffit d'imposer plusieurs cycles hydriques sur des éprouvettes. Ces cycles ont été appliqués sur des éprouvettes de sols compactés de manière à observer l'évolution la perméabilité du matériau compacté dans le temps sous l'influence de son environnement météorologique.

Une douzaine de cycle a été réalisé pour caractériser l'évolution après 12 ans. Nous avons ainsi pu quantifier ses propriétés de conductivité hydraulique jusqu'à 12 cycles et sur l'évolution de sa microstructure jusqu'à 6 cycles. Ce travail s'intègre dans une étude plus générale de la durabilité des digues (Boussafir, 2019).

2. Description des matériaux testés

Les essais ont été réalisés sur des sols en provenance d'une digue ancienne située à La Ville-aux-Dames (37). Les sols prélevés à la tarière mécanique par le bureau d'étude Fugro, ont été homogénéisés en laboratoire, puis identifiés (Boussafir et al., 2018).

Il s'agit d'un limon sableux brun, classé B5 selon la norme NF P11-300 (Afnor, 1992), avec environ 21% de passant à 80 μ m et une VBS de 0,68 g bleu/100 g de sol.

Les sols ont été compactés pour obtenir les perméabilités les plus faibles possibles (Afnor, 2018), avec une masse volumique proche de 95% de l'optimum Proctor normal ($\rho_d = 1,851 \text{ t/m}^3$) et un état hydrique humide ($w = 12,2\%$).

Les matériaux ont été compactés statiquement pour obtenir des éprouvettes cylindriques 5x10 cm pour les mesures de conductivité hydraulique au triaxial et 1,5x2 cm pour observer la microstructure au tomographe à Rayon X (Figure 1).

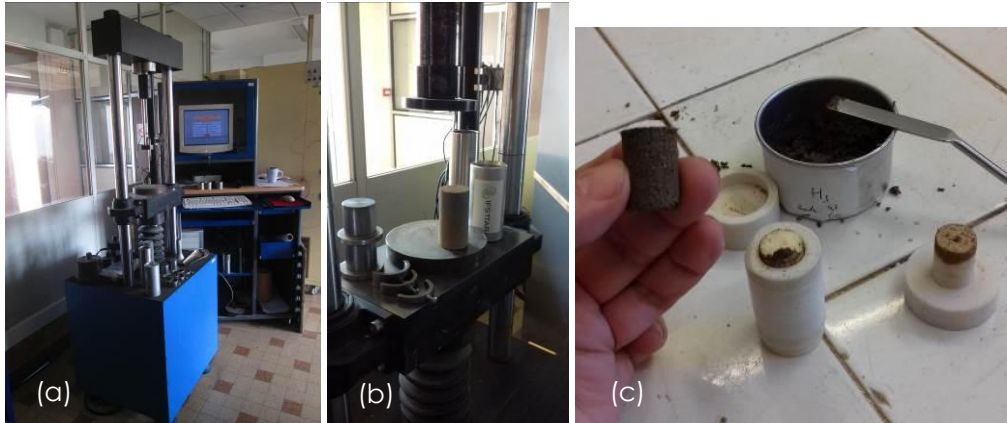


Figure 1. (a) et (b) presse statique pour la confection des éprouvettes cylindriques 5x10 cm (c) moule pour la confection des éprouvettes 1,5x2 cm

3. Méthodologie de séchage et d'humidification adoptée

Il existe plusieurs méthodes pour les cycles hydriques. Ces méthodes sont variables tant sur la durée des différentes étapes, que sur les moyens de sécher, d'humidifier et sur le degré de saturation final visé.

Pour l'expérience, nous avons privilégié les méthodes les moins agressives, permettant de conserver une forme cylindrique à la fin de chaque étape de séchage et d'humidification, et permettant également d'obtenir un degré de saturation satisfaisant.

3.1. Séchage

Le séchage est facile à obtenir sur des matériaux limono-sableux et ne nécessite pas de moyens particuliers. Nous avons appliqué la méthode préconisée par Makki et al. (2008) basée sur un séchage à l'air libre et à température ambiante en laboratoire.

Dans ces conditions, le séchage permet d'atteindre un degré de saturation de l'ordre de 10%, soit 1 à 3% de teneur en eau, en l'espace de 4 à 5 jours.

3.2. Humidification

L'humidification a été obtenue de deux manières : par adsorption d'eau en phase gazeuse dans une atmosphère humide pendant 3 jours et par remontée d'eau capillaire sur une durée maximale de quelques heures.

Dans les deux méthodes, le degré de saturation obtenu dans les éprouvettes 5x10 cm est proche de 80%, soit environ 13 à 15% de teneur en eau.

Pour les éprouvettes 1,5x2 cm utilisées pour la tomographie aux Rayons X, l'humidification a été obtenue en imbibant les sols au goutte-à-goutte. Cette méthode est très proche de l'humidification par capillarité.

3.3. Cycles de séchage et d'humidification

Les cycles de séchage et d'humidification (1 cycle correspondant à 1 séchage suivi d'1 humidification), ont été appliquées sur les lots d'éprouvettes jusqu'à 12 cycles.

Deux lots d'éprouvettes 5x10 cm ont été confectionnées : un pour suivre les performances des éprouvettes humidifiées par remontée capillaire, l'autre par adsorption. L'éprouvette de petite dimension (1,5x2 cm) a suivi 6 cycles d'humidification séchage pour l'observation en tomographie aux rayons X.

4. Evolution de la perméabilité en fonction du nombre de cycles hydriques

Les perméabilités ont été mesurées au Cerema de Blois sur les éprouvettes 5x10 cm dont la taille est adaptée aux appareillages pour essais triaxiaux.

À la fin de chaque étape d'humidification, les éprouvettes placées en cellule triaxiale, ont été saturées à 100%, puis sollicitées avec un gradient hydraulique de 2 pour la mesure des débits d'eau sortants, et évaluation de la conductivité hydraulique.

Les essais ont été réalisés en suivant la norme NF X30-443 (Afnor, 2014). Les membranes souples présentent l'avantage de s'adapter parfaitement aux éprouvettes ce qui limite fortement les circulations d'eau parasite aux interfaces grâce à l'application d'une contrainte latérale de confinement de 50 kPa. La contrainte au niveau du chapeau était de 10 kPa et de 30 kPa au niveau du socle. Les débits entrants et sortants sont ensuite consignés à pas de temps régulier, à partir des informations fournies par les générateurs de pression/volume. La température de l'eau est notée à chaque essai pour corriger la valeur de conductivité hydraulique et la ramener à une valeur de perméabilité à 10°C (valeur retenue par le Cerema de Blois pour les études sur les digues de Loire).

Les résultats obtenus à 0, 1, 3, 6, 9 et 12 cycles sont présentés sur la Figure 2. Sur cette même figure sont représentés les résultats obtenus par Mehenni (2015) sur un limon A2 dans des conditions expérimentales similaires avec une humidification par remontée capillaire.

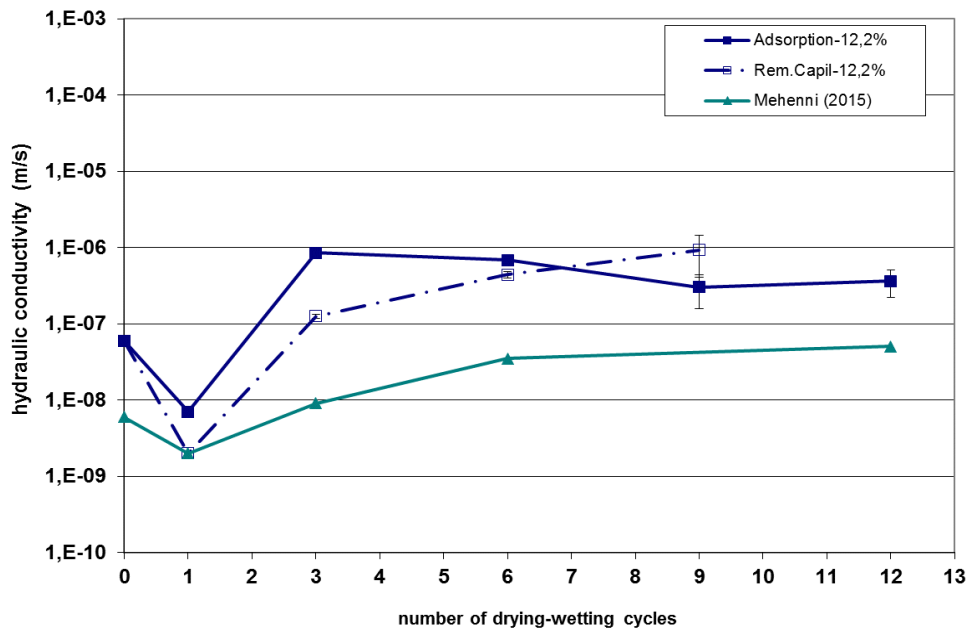


Figure 2. Évolution de la conductivité hydraulique mesurée sur éprouvettes compactées statiquement, à $w_i=12,2\%$ en fonction du nombre de cycles hydriques appliqués (échantillons humidifiés par adsorption et par remontée capillaire). La courbe en vert reproduit le résultat obtenu sur du limon compacté et humidifié par remontée capillaire (Mehenni, 2015).

La perméabilité initiale du matériau (0 cycle) est légèrement inférieure à 10^{-7} m/s ce qui est une valeur satisfaisante pour un ouvrage hydraulique.

Après le premier cycle de séchage puis d'humidification, avec les deux modes d'humidification retenus, la perméabilité baisse sensiblement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-8} m/s. La perméabilité de l'échantillon humidifié par la méthode de

remontée capillaire, mesurée sur un seul échantillon, est plus faible que celle obtenue avec l'échantillon humidifié en atmosphère humide.

Après 3 cycles de séchage et d'humidification, les perméabilités augmentent et deviennent plus élevées que la perméabilité initiale. On constate quelques différences de comportement entre les éprouvettes humidifiées en atmosphère gazeuse et par remontée capillaire mais *in fine*, la perméabilité à l'issue de 12 cycles est plus grande que la perméabilité initiale et de l'ordre de 10^{-6} m/s. À cette valeur, la performance n'est plus du tout satisfaisante pour un ouvrage hydraulique.

On constate ainsi que le vieillissement accéléré par des cycles hydriques successifs entraîne une dégradation de la perméabilité initiale. Ceci confirme les résultats obtenus par Mehenni (2015). Dans son cas, avec un matériau testé plus argileux, les valeurs de perméabilité passent de 10^{-9} m/s à 10^{-8} m/s, ce qui correspond également à une augmentation d'une puissance de 10. On constate aussi une dégradation de la performance, mais les résultats restent satisfaisant pour un ouvrage hydraulique.

5. Evolution de la microstructure observée en tomographie par Rayons X

La tomographie par rayons X est une technique d'imagerie radiologique permettant d'avoir accès de manière non destructive à la microstructure interne d'un échantillon. Ceci nous a permis d'observer l'évolution de la microstructure d'un même échantillon au cours des 6 cycles hydriques que nous avons imposés.

Le microtomographe Phénix Nanotom de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), université d'Orléans, est équipé d'un tube à rayons X de 180kV /15W avec une précision qui nous a permis d'avoir une résolution de 7,5 μ m pour des éprouvettes de 1,5 cm de diamètre. Une fois le volume reconstitué à partir des projections, le logiciel de traitement en 3D VGSTUDIO MAX (<https://www.volumegraphics.com/fr/products/vgstudio-max.html>) permet plusieurs possibilités d'analyses, avec visualisation non destructive des tranches en 2D et 3D. Le traitement de l'information étant très complexe et long, il a été décidé de restreindre le champ d'analyse à des coupes en 2D, plus particulièrement à trois sections en haut (proche de la surface libre), au milieu, et dans le tiers inférieur de l'échantillon en bas de l'éprouvette (Figure 7).

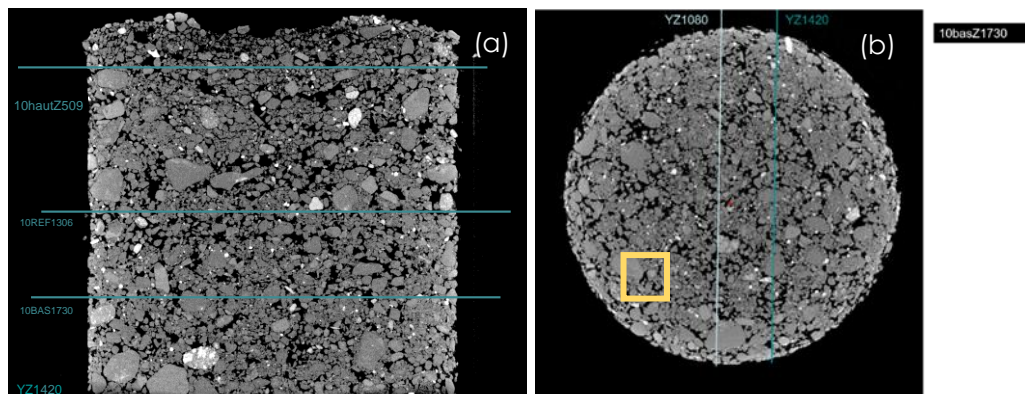


Figure 3. (a) Image en coupe de l'échantillon (b) image de la section étudiée située à environ 1/3 du bas. En jaune, la zone détaillée en Figure 7 ($\varnothing = 1,5$ cm)

Les filtres appliqués aux images, d'abord avec VGSTUDIO MAX puis avec le logiciel FIJI (<https://fiji.sc/>) ont permis d'extraire des informations sur la porosité et la microstructure. C'est l'exploitation de ces informations qui est présentée ci-dessous.

5.1. Présentation de l'échantillon étudié

Les rayons X traversent l'échantillon sans le modifier. Cela permet d'examiner l'évolution de la microstructure aux mêmes endroits, à partir de repères correctement localisés.

Les images obtenues ont ensuite été analysées par traitement d'image à l'aide du logiciel FIJI pour en extraire la porosité (Figure 4b). Ces données ont été ensuite exploitées avec le logiciel SPO (Launeau et Robin, 1996 ; <https://www.univ-nantes.fr/version-francaise/patrick-launeau-2774.kjsp>) qui permet d'extraire les surfaces et les formes des objets qui apparaissent sur l'image segmentée (Figure 4c).

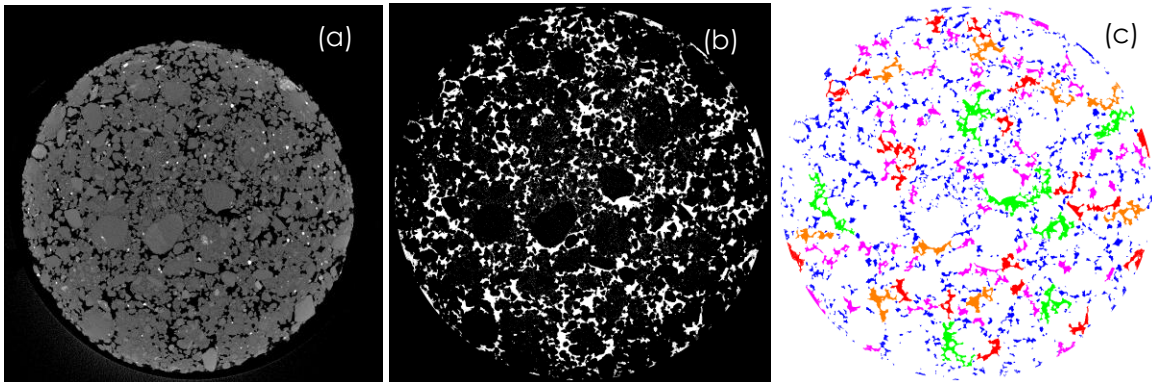


Figure 4. (a) image obtenue avec VGSTUDIO MAX : la matrice minérale apparaît en intensité de gris et la porosité en noir (b) image traitée avec FIJI : la porosité apparaît en blanc et le reste en noir (c) analyse de la porosité segmentée avec le logiciel SPO.

5.1. Analyse de la porosité totale

La Figure 4b illustre la répartition de la porosité en blanc sur la photo. Cette porosité correspond à ce qui sépare les grains solides et regroupe indistinctement la phase air et eau du sol. Nous avons quantifié la surface de la porosité sur les trois sections étudiées puis fait la moyenne à chaque étape de séchage et d'humidification. Chaque résultat a été normalisé à la surface des vides initiale, ce qui permet une représentation de l'évolution relative de la porosité en fonction des cycles hydriques. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.

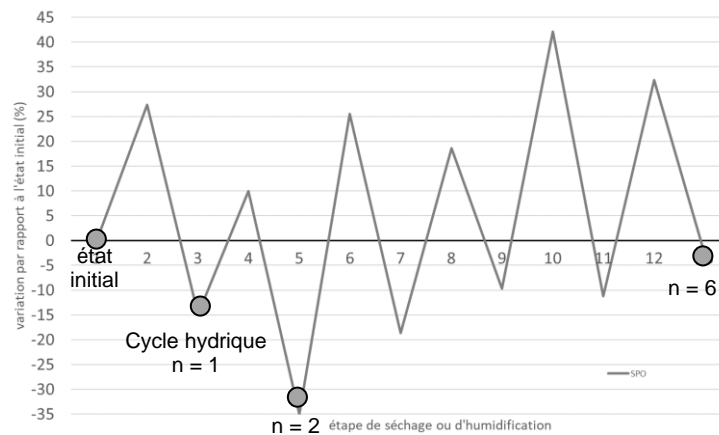


Figure 5. Évolution de la porosité moyenne de l'échantillon à chaque étape de séchage et humidification (avec n = nombre de cycles hydriques complets) avec le logiciel SPO.

Les étapes de séchage augmentent la porosité et les étapes d'humidification les réduisent, ce qui correspond au phénomène connu de retrait gonflement des sols fins.

L'analyse qui suit focalise essentiellement sur les évolutions des étapes impaires qui correspondent aux étapes d'humidification. Ces étapes correspondent aux étapes de mesure de la perméabilité sur les éprouvettes 5x10 ce qui nous permet de comparer de manière conjointe l'analyse de l'évolution de la perméabilité et de la porosité.

On constate ainsi lors des deux premiers cycles hydriques, à l'étape 3 (n=1 cycle) et 5 (n=2 cycles) de la Figure 9, que la porosité totale est très nettement inférieure à la porosité de la situation initiale : la porosité totale a diminué de 35% par rapport à la porosité initiale. Cette diminution est à mettre au regard de la diminution de la conductivité hydraulique constatée sur éprouvette après 1 cycle. Puis elle augmente et revient progressivement jusqu'à l'étape 13 (n=6 cycles), à une valeur de porosité totale proche de la porosité initiale. Dans le même temps, la perméabilité a pour sa part augmenté et a dépassé la valeur initiale comme on peut le voir sur la Figure 2.

5.1. Analyse de l'évolution de la porosité

Le logiciel SPO permet d'exploiter les objets recensés par leur taille. Ceci permet d'avoir accès au nombre de pores recensés à chaque étape de séchage ou d'humidification et à leur surface en μm^2 sur les trois sections observées. Les valeurs obtenues sur les trois sections ont été moyennées pour obtenir le Tableau 1 et la Figure 6.

Tableau 1. Évolution du nombre de pores recensés sur les 3 sections et de leur surface médiane au cours des étapes de séchage et d'humidification au cours de 6 cycles hydriques

étape	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nb de pores	964	1861	1670	1715	1347	1889	1511	2010	1668	2085	1858	1853	1828
Surf. médiane (μm^2)	7565	2737	2981	2906	2718	2878	2849	2756	2943	2775	2615	3075	2531

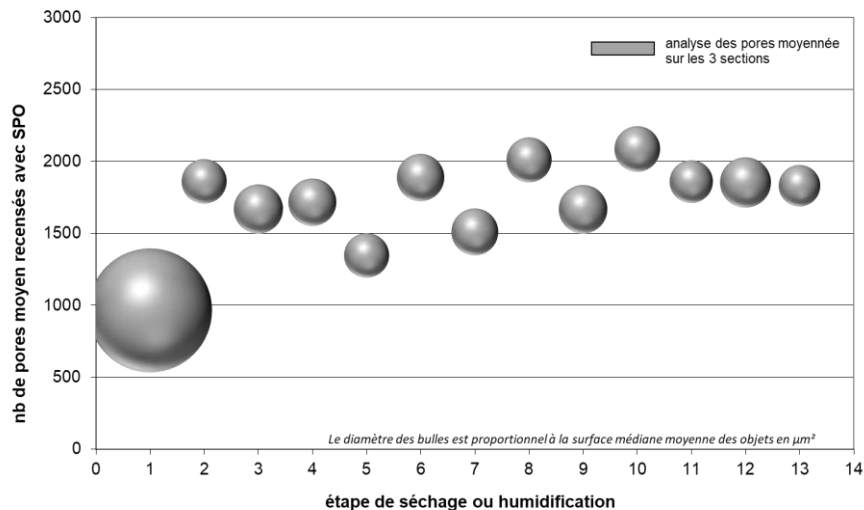


Figure 6. Évolution du nombre et de la taille des pores à chaque étape de séchage et d'humidification sur la moyenne des 3 sections étudiées.

On observe sur cette figure que la porosité observée en section horizontale, se modifie au cours des différentes étapes. À l'état initial (étape 1), la porosité est essentiellement composée de pores peu nombreux mais de grande dimension : la surface médiane¹ est de $7565 \mu\text{m}^2$. Cette description est à rattacher à la valeur de perméabilité de 10^{-7} m/s.

La première phase de séchage a immédiatement pour conséquence de réduire la taille médiane des pores ($2737 \mu\text{m}^2$) et d'augmenter leur nombre de manière très significative.

On constate au cours des étapes qui suivent, une oscillation entre un effet contractant à l'humidification et un effet augmentant le nombre de pores au séchage. La surface médiane des pores évolue peu quant à elle : elle est de $2531 \mu\text{m}^2$ à la fin du cycle n = 6.

On rappelle que la porosité totale à la fin du cycle 2, a baissé de 35% et que cette porosité est composée d'une famille de pores très différente de ce qui est observé à l'état initial, immédiatement après compactage. Il s'agit de pores de beaucoup plus petite

¹ la médiane a été préférée à la moyenne dans cette étude

dimension mais globalement plus nombreux. Cela permet de bien comprendre pourquoi la perméabilité mesurée sur éprouvette diminue à 10^{-8} m/s dans un premier temps.

Les étapes qui suivent et jusqu'à l'étape 13 (cycle $n = 6$) ne modifient plus fondamentalement la porosité : le nombre de pores est toujours plus élevé qu'au départ (celui-ci a presque doublé en passant d'environ 1000 pores à l'état initial à un peu moins de 2000 à la fin du cycle $n = 6$). La taille médiane des pores (en μm^2) est presque identique à ce qui a été observé à l'étape de séchage 2. Les pores sont donc globalement beaucoup plus petits qu'immédiatement après compactage. Et même si la porosité totale est la même en terme de surface de vide totale, les données de conductivité hydraulique montrent (Figure 6) que l'eau ne circule plus de la même façon dans le matériau.

L'évolution de la microstructure est illustrée par les images en tomographie par Rayon X de la Figure 7.

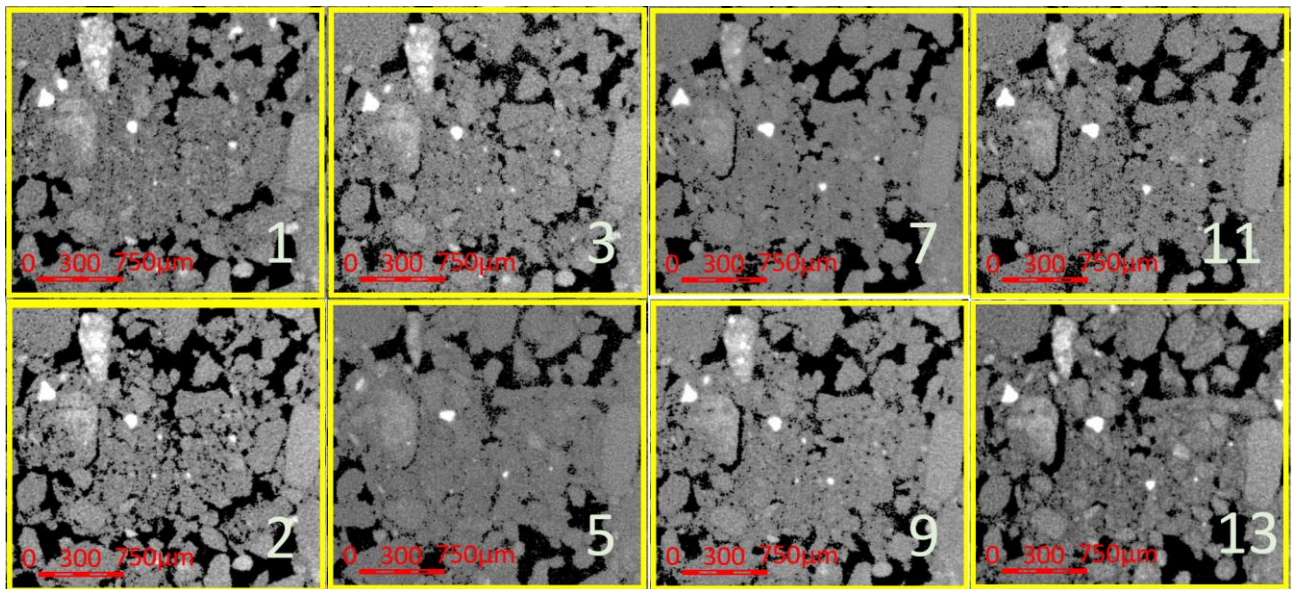


Figure 7. Évolution de la microstructure du limon sableux compacté entre l'état initial (étape 1) et après 6 cycles hydriques (étape 13). La structure en agrégat et la porosité se modifie.

Après compactage, l'eau circule dans une macroporosité formée de gros pores de grande dimension telle qu'on peut l'observer sur les sections horizontales. La perméabilité est influencée par la vitesse de circulation de l'eau dans cette macroporosité, avec probablement une anisotropie verticale prononcée (Alonso, 2005).

Après 6 cycles hydriques, la macroporosité est formée de très petits pores de petite dimension et cette transformation est constatée sur section horizontale mais doit s'opérer également verticalement. Si la surface de vides sur une section donnée est bien la même qu'à l'état initial, elle est composée de 2 fois plus de petits pores. La vitesse de circulation de l'eau à cette étape se traduit par une perméabilité 10 fois plus élevée.

On peut expliquer ces résultats soit par une modification de l'anisotropie de la porosité obtenue par compactage, soit par une augmentation de la connectivité des pores liée à la fragmentation des agrégats. Ces résultats devront être confirmés car dans tous les cas on observe que les cycles hydriques ont des répercussions sur la mesure de la perméabilité et que ces mêmes observations ont été faites dans d'autres laboratoires (Mehenni, 2015).

On constate également que l'évolution de la forme des agrégats est profondément altérée et que cette évolution est irréversible dans le cas du sol B5 testé. Les petits pores proviennent pour partie du fractionnement de ces agrégats et du fractionnement de la macroporosité initiale. La forme de l'agrégat n'est plus aussi clairement identifiable après les 13 étapes de séchage et d'humidification successive.

6. Conclusions

Les travaux présentés ici, couplant mesures de perméabilité et observations microstructurales en tomographie par Rayon X, ont mis en évidence que la perméabilité initiale d'un sol B5 compacté est évolutive et qu'elle se dégrade sous l'effet de cycles hydriques reproduisant les interactions avec l'atmosphère.

Le mécanisme de dégradation qui se développe sous l'effet de l'alternance de phase de séchage et d'humidification, modifie de manière irréversible la microstructure, et ceci dès le premier cycle hydrique, ce qui se répercute sur sa conductivité hydraulique.

Dans un premier temps, la modification de la porosité conduit à une contraction de la porosité et une diminution de la perméabilité.

Puis après 3 cycles hydriques successifs, la porosité se fractionne de manière conséquente, en gommant probablement l'anisotropie verticale due au compactage. Ceci a pour conséquence d'augmenter la perméabilité verticale.

7. Références bibliographiques

- Afnor (1992). NF P11-300. Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- Afnor (2005). NF EN 13286-53. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 53 : méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques
- Afnor (2009). NF ISO 20340. Peintures et vernis – Exigences de performance relatives aux systèmes de peinture pour la protection des structures offshore et structures associées.
- Afnor (2014). NF X30-443. Déchets – Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau – Perméamètre à paroi flexible à gradient hydraulique constant. 30 pages.
- Afnor (2018). FD P11-302. Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté.
- Alonso E. (2005). Compactage et comportement des sols fins humides. Revue Française de Géotechnique, n°111, 2^{ème} trimestre 2005. pp.33-43.
- Bicalho K., Boussafir Y., Cui Y.-J. (2018). Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France. Transportation Geotechnics. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.009>.
- Boussafir Y., Mercadier D., Cui Y.-J. (2016). Suivi du vieillissement d'un remblai traité à Héricourt (70) : quels enseignements sur la durabilité ? Colloque JNGG 2016 Nancy. 06-08 juillet 2016.
- Boussafir Y., Saussaye L., Dissler E. et Durand E. (2018). Des anomalies géotechniques à l'origine de propositions d'indicateurs de durabilité pour les digues fluviales. Colloque JNGG 2018 Marne-la-Vallée. 13-15 juin 2018.
- Boussafir Y. (2019). Durabilité des digues fluviales. Thèse Ecole Doctorale SIE, Univ. Paris Est.
- Launeau P. and Robin P-Y. (1996). Fabric analysis using the intercept method. Tectonophysics, n°267, pp.91-119. doi:10.1016/S0040-1951(96)00091-1
- Makki L., Duc M., Droniuc N., Reiffsteck P., Maloula A., Magnan JP. (2008). Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse. Symposium international Sécheresse et construction. SEC 2008. Marne-la-Vallée, 1-3 septembre 2008. Edition LCPC. Vol. 1. pp.257-264.
- Mehenni A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Thèse Univ. Lorraine. 213 pages et 11 annexes. <http://www.theses.fr/2015LORR0299#>